

# DLTS 시스템에서의 신호처리에 관한 연구

## (A Study on the Data Analysis Systems in Deep Level Transient Spectroscopy)

林漢祚\*, 李愚湧\*, 崔然益\*, 鄭相九\*, 金顯男\*

(H. Lim, W. Y. Lee, Y. I. Choi, S. K. Chung and H. N. Kim)

### 要 約

깊은준위의 파라미터들을 측정하는데 사용되는 DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy) 시스템에서의 신호처리 방법을 신호대 잡음비, 스펙트럼의 분리도 등을 중심으로 비교하였다. 그 결과 농도가 적은 깊은준위를 측정하는데 있어서 광대역 二相 lock-in 증폭기를 사용한 DLTS 시스템이 측정의 간편성과 특성의 우수성등 장점이 있음을 논의하였다. 논의과정에서 도출된 rate window 개념의 확장으로부터 1회 온도주사로 깊은준위의 파라미터를 구하는 방법을 제안하였고, 이를 n-GaAs의 깊은준위 측정에 적용함으로써 그 타당성을 검토하였다.

### Abstract

Data analysis methods in lock-in amplifier based DLTS systems were discussed with regards to the signal-to-noise ratio and improvement of resolution of DLTS spectrum. The DLTS system based on wideband two-phase lock-in amplifier is shown to be the most preferable for the studies in deep levels of low concentration. A single-temperature scanning DLTS methods in lock-in amplifier based system with the improved sensitivity is proposed. The method is tested on the characterization of deep levels in n-GaAs.

### I. 序 論

반도체내의 깊은준위(deep level)결함은 전하 덩 (carrier trap)이나 재결합중심(recombination center) 등으로 작용하여, 전자소자의 특성에 지대한 영향을 미칠 뿐만 아니라,<sup>[1]</sup> 최근 이들이 반도체 소자의 제조공정과도 관련됨이 조사 보고됨에 따라,<sup>[2]</sup> 이들에 관한 관심이 더욱 고조되고 있다. 이와같은 깊은준위들이 소

자에 미치는 영향은 그들의 파라미터인 에너지 준위, 전하 포획단면적(capture cross-section) 및 농도에 따라 결정되는 바, 이들 파라미터 측정에 있어서 Lang이 제안한 DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy) 방법은<sup>[3]</sup> 그 간편한 해석과 높은 측정감도등의 장점때문에 현재 가장 널리 사용되고 있다.

DLTS 시스템에서 깊은준위의 측정감도는 채택하는 신호처리 방법에 크게 의존하므로,<sup>[4]</sup> 소자의 제작과정과 관련된 깊은준위의 경우와 같이 저농도의 깊은준위를 측정하기 위해서는 고감도 DLTS 시스템이 필수적으로 요구된다. 한편 DLTS 시스템에서 신호처리를 위한 상관기(correlator)로는 double sampling 방법과,<sup>[5]</sup> 적분기를 사용하는 방법으로<sup>[4]</sup> 나눌 수 있는데, 일반적으로 적분기를 사용하는 경우의 S/N비가 10~

\*正會員, 亞洲大學校 工科學 電子工學科  
(Dept. Elec. Eng., Ajou Univ., Suwon)

接受日字: 1985年 9月 18日

(※ 본 연구는 1984년도 아주대학교 교내연구비의 지원으로 이루어졌음.)

~100배 증가됨이 잘 알려져 있다.<sup>13)</sup> 그러나 적분기를 사용하는 경우 injection pulse에 의해 나타나는 불필요한 과도정전용량(transient capacitance)을 제거하기 위한 gate-off회로가 필요하고, 복잡한 필터를 사용하는 경우 신호를 재구성해야 하는 불리한 점이 있다.<sup>14,15)</sup>

본 연구에서는 lock-in amplifier를 사용한 간편한 필터 시스템에서 gate-off회로에 의한 영향을 제거하는 방법을 살펴보고, 이 lock-in based DLTS 시스템을 사용하여 1회의 온도주사로부터 주어지는 DLTS 스펙트럼의 곡선모양(line shape)으로부터 깊은준위의 파라미터를 구하는 방법을 제안하였다. 이들 고찰을 n-GaAs에 제작한 Schottky diode에 적용하여 그 타당성을 실험적으로 확인하였다.

II. Rate Window 개념과 그 확장

깊은준위 측정을 위한 DLTS 이론은 이미 잘 알려진 바이며,<sup>13,15)</sup> 각 결함의 축퇴도와 상호작용이 없다고 가정 할 때 주어진 임의의 온도 T에서의 전자(정공) 방출률  $e_n(e_p)$ 는 Shockley-Read-Hall모형으로부터  $e_n(e_p) = AST^2 \exp(-\Delta E/kT)$  (1) 로 주어지며,<sup>13)</sup> 여기서 k는 Boltzmann 상수, S는 전자(정공) 포획단면적, A는 시료에 따른 상수로써 n-GaAs의 경우  $2.28 \times 10^{20} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{K}^{-1}$ 의 값을 가진다. 따라서 여러 온도  $T_i$ 에서의 전자(정공) 방출률  $e_{ni}(e_{pi})$ 를 측정함으로써  $\ln(e_{ni}/T_i^2)$  대  $1/T_i$ 를 도시한 Arrhenius diagram으로부터 깊은준위의 여기 에너지  $\Delta E$ 와 포획단면적 S를 구할 수 있다.

논의의 간편을 위하여 그림 1 (A)와 같이 깊은준위가 존재하는 n형 반도체로 제작된 Schottky diode를 고려할 때에, 이 다이오드에 (B)와 같은 펄스를 가하면 역바이어스 동안의 과도정전용량은 (C)와 같이

$$\Delta C(t) = \Delta C_0 [1 - \exp(-e_n t)], \quad \Delta C_0 = N_T / 2N_0 \cdot C_0 \quad (2)$$

로서 시간에 대한 지수함수로 주어진다.<sup>16)</sup> 여기서  $N_0$ 는 유효 주개농도이며,  $N_T$ 는 전자덜기로 작용하는 깊은 준위의 농도이다. 실제로는 여러가지 요인으로 비 지수적 과도정전용량이 나타나는 경우가 있으나,<sup>16)</sup> 본 연구에서는 DLTS에서의 상관방법만 논의하므로, (2)식은 항상 성립하는 것으로 가정한다.

일반적으로 상관기로부터의 출력은 입력신호가  $\Delta C(t)$  일 때

$$Y = \int_0^{t_m} \Delta C(t) w(t) dt \quad (3)$$

으로 주어지며, 여기서  $t_m$ 은 상관기의 적분시간,  $w(t)$ 은 적분에 사용되는 무게함수(weighting function) 이

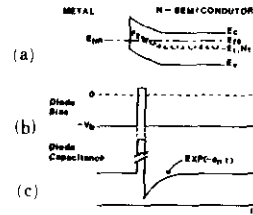


그림 1. 깊은준위가 존재하는 다이오드에서 급격한 바이어스 전압의 변화에 따른 과도정전용량 응답

- (a) n-Schottky diode의 에너지 대역도
- (b) 다이오드에 인가한 바이어스
- (c) 인가 바이어스에 따른 다이오드의 과도정전용량

Fig. 1. Transient capacitance response of a diode containing a deep level by the abrupt change of bias.

- (a) Band diagram of n-schottky diode
- (b) Bias sequence on the diode
- (c) Transient capacitance corresponding to bias pulse

다. Lang이 제안한 double gate box-car는 그림 2 (a)와 같이  $t_1$ 과  $t_2$ 에 sampling하는  $w(t) = \delta(t - t_1) - \delta(t - t_2)$ 에 해당되며, DLTS 스펙트럼의 최대치는  $\partial Y / \partial e_n = 0$ 인 조건으로부터  $\tau = 1/e_m = (t_2 - t_1) / e_n(t_2/t_1)$ 으로 주어지는 "rate window"값에서 산출된다. 여기서  $e_m$ 은 DLTS peak치에서의 전자방출률이다. 신호대 잡음비를 증가시키기 위하여 적분기를 사용하는 경우,<sup>14,15)</sup> 고려되어야 할 사항은 injection pulse동안 발생하는 불필요한 과도정전용량을 제거하기 위한 gate-off 회로, 적분기간의 선택, 무게함수의 선택 등이다.<sup>14)</sup> Gate-off회로도에는 일반적으로 sample and hold회로가 사용되고 있으며,<sup>14,15)</sup> 무게함수로는 순수한 과도정전용량을 측정하기 위해  $\int_0^{t_m} w(t) dt = 0$ 을 만족하는  $w(t)$ 를 선택한다.<sup>14)</sup> Crowell 등은 여러 형태의 적분기에서 백색잡음(white noise)에 의한 S/N비를 논의하였으며,<sup>14)</sup> 지수함수를 무게함수로 선택하는 경우 S/N비가 가장 좋음을 보였다. 그러나 지수적 상관기의 경우 1/f 잡음에 대해서는 lock-in 증폭기에 비하여 훨씬 민감한 것은 잘 알려진 사실이며, 한편 신호를 재구성 하여야 하는 문제점도 있다.<sup>17)</sup>

적분기로서 lock-in 증폭기를 사용하는 경우, 온도에 따른 과도정전용량의 변화를 Day 등이 행한바와 같이<sup>18)</sup>  $w(t)$ 로서 sine함수를 선택하여 푸리에변환 DLTS를 행하거나 광대역 lock-in으로 그림 2의 (b), (c)와 같은 필터를 형성하는 방법으로 나눌 수 있다. 푸리에변환 DLTS의 경우 그 변환의 특성상 잡음제거에는 우수하나, 동기화와 관련된 세 문제가 발생된다.<sup>18)</sup> 본 연구

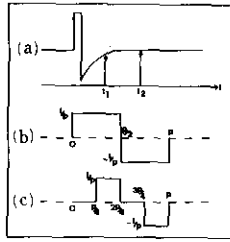


그림 2. 과도정전용량 및 전형적인 상관기들  
 (a) 두 게이트 박스-카  
 (b) 광대역 lock-in 증폭기의 I 출력력에 해당하는 적분기  
 (c) 광대역 lock-in 증폭기의 I-Q 출력력에 해당하는 적분기

Fig. 2. Transient capacitance and typical correlator systems.  
 (a) Dual gate box-car  
 (b) Weighting function of integrator by I output of wide-band lock-in  
 (c) Weighting function of integrator by I-Q output of wide-band lock-in

예시와 같이 광대역 lock-in 증폭기를 사용하는 경우, I(in phase) 출력성분은 그림 2(b)와 같은 필터를 형성하고, I-Q 출력은 (c)와 같은 필터를 형성한다. 그림 2의 (b), (c) 필터의 차이는 (3)식에서 적분기간의 차이만으로 나타나는 논의는 간단한 그림 2의 (b)로 국한한다. 식(2)와 (3)으로부터 lock-in의 I 출력성분은

$$Y(e_n, p) = \Delta C_0 / p \left[ \int_0^{p/2} \exp(-e_n t) dt - \int_{p/2}^p \exp(-e_n t) dt \right] \quad (4)$$

로 주어지며, 이때 p는 lock-in 증폭기를 구동하는 주기이다. Rate window는  $\partial Y / \partial e_n = 0$  으로부터  $e_m = 2.51f$ 로 주어지며, Crowell 등이 S/N비를 나타내기 위하여 정의한 감도지수 (figure of merit)는 "F = 0.208로 주어진다. 따라서 구동 주파수 f를 변화시킴으로써, rate window를 변화시킬 수 있으며, 각 rate window에서 나타나는 DLTS 피크의 온도를 측정함으로써 깊은준위의 여기에너지,  $\Delta E$ 와 전자 포획단면적, S를 구할 수 있다. 이 때 입력을 정규화하면 (즉  $\Delta C_0 = 1$ 로 취하면), 임의의 온도 T에서의 출력은

$$Y_n(T) = \frac{f}{e_n} [1 + \exp(-e_n/f) - 2\exp(-e_n/2f)] \quad (5)$$

로 주어지며  $e_n$ 을  $x = e_n/e_m = e_n/2.51f$ 로 변수변환하여 F(x)로 취하고, 다시 F(1)로 나누어 정규화하면, DLTS 피크에서 1의 값을 갖는 정규화된 DLTS 스펙트럼은

$$F_n(x) \equiv F(x)/F(1) = \frac{1.9565}{x} [1 + \exp(-2.51x) - 2\exp(-2.51x/2)] \quad (6)$$

으로 나타낼 수 있다. 이때  $F_n(x) = \theta$  ( $0 < \theta \leq 1$ ) 를 만족하는 해를  $x_0^+$  ( $x_0^+ > 1$ ,  $x_0^- < 1$ )라 정의하고, 그림 3에서와 같이 이때의 온도를  $T_0^+$ 로 정의하면 (1)식으로부터,

$$e_n^+(\theta) = AS(T_0^+)^2 \exp(-\Delta E/kT_0^+) = e_m x_0^+ \quad (7)$$

로 주어진다. 따라서 여러  $\theta$ 값에 대응하는  $x_0^+$ 값을 (6)식으로 부터 구하고, 그 값과 DLTS 스펙트럼으로부터 측정된  $T_0^+$ 값을 (7)식에 대입함으로써 rate window 이외의 부분, 즉 DLTS 스펙트럼 피크치 이외의 모든 부분에서도 전자방출률  $e_n$ 을 결정할 수 있다.

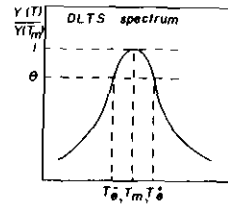


그림 3.  $T_m, T_0^+$ 와  $\theta$ 의 정의  
 Fig. 3. Definition of  $T_m, T_0^+$  and  $\theta$ .

표 1은  $0 < \theta < 1$ 에 해당하는  $x_0^+$ 값을 (6)식으로부터 구한 결과이다. 표 1에서  $\theta = 0.5$ 의 값을 취하여 (7)식에 대입하여 계산된 반폭(half width)에서의 전자 방출률의 차  $\Delta e_n$ 과  $e_m$ 의 비는  $\Delta e_n/e_m \approx 3.64$ 로 주어진다. 논의한 바와 같은 방법을 二相 lock-in 증폭기에서 I-Q 출력으로 주어지는 그림 2(c)와 같은 필터에 적용한 경우 rate window는  $e_m = 1.72f$ 로 주어지며,  $\Delta e_n/e_m = 2.65$ ,  $F = 0.108$ 로 주어짐을 쉽게 증명할 수 있고, 주파수 선택형 lock-in 증폭기(selective lock-in amplifier)를 사용하여 행하는 푸리에변환 DLTS의 경우도  $e_m = 2.36f$ ,  $\Delta e_n/e_m \approx 3.07$ 임을 증명할 수 있다.

표 1.  $\theta$ 에 대응하는  $x_0^+$ 의 값  
 Table 1. Value of  $x_0^+$  corresponding to  $\theta$ .

$\theta$	$x_0^-$	$x_0^+$	$\theta$	$x_0^-$	$x_0^+$
0.9	0.5759	1.6733	0.5	0.2097	3.8465
0.8	0.4388	2.1103	0.4	0.1575	4.8640
0.7	0.3443	2.5770	0.3	0.1117	6.5106
0.6	0.2706	3.1809	0.2	0.0708	9.7713

전자 방출률이 가까운 두 종류의 전자덫에 의하여 DLTS 피크가 부분적으로 중복되어 나타날 경우,  $\Delta e_n/e_m$ 이 감소함에 따라 두 스펙트럼이 더욱 잘 분리되므로, 앞서의 논의로부터 二相 lock-in 증폭기를 사용하는 경우 비록 감도지수는 낮으나, 스펙트럼의 분리도 면에서 더욱 우수함을 알 수 있다. 또한 그림 2(b) 필

터의 경우 이상적인 gate-off 회로가 가정되었으나, 그림 2 (c)의 경우에는 비 이상적 gate-off 회로에 의한 영향도 필터의 형태로부터 처음 P/4 동안 자동적으로 제거되므로 비 이상적 gate-off 회로에 의한 영향이 DLTS 스펙트럼에 전혀 나타나지 않음을 알 수 있다.

III. 實 驗

본 실험에 사용된 시료는 KAIST 반도체 재료 연구실에서 Horizontal Bridgman (HB) 방법으로 성장시킨 undoped n-GaAs로서, 실온에서의 자유전자 농도는  $N_p \approx 4 \times 10^{15} \text{cm}^{-3}$  이었다. DLTS 측정을 위한 시편으로는 Schottky diode를 택하였으며, 이때 저항성접촉은 Au-Ge (13%) 고용체를 진공증착 시킨후 400°C에서 3분간 annealing 하였으며, schottky 접촉은 진공증착된 Al으로 형성시켰다. 제작된 schottky diode의 접촉전위는 시편에 따라 0.6~0.9V사이의 값을 갖고 있었다.

그림 4에 나타낸 바와 같이 사용된 DLTS 시스템은 pulse generator, gate-off 회로, lock-in 증폭기등이 모두 function generator로부터 나오는 구형파와 동기되었으며, -2V역 바이어스에 첨가된 injection pulse는 200μs, 0.2V로 하여 capacitance meter를 통하여 다이오드에 인가하였다. 이때 capacitance meter로는 1msec의 응답시간과 1MHz, 15mV의 test signal을 갖는 Bonton 72B를 사용하였다. 측정된 아날로그 출력은 gate-off 회로를 통하여 PAR128A 單相 lock-in 증폭기에 입력되어 신호처리된 후 X-Y recorder에 나타내어졌다. 통상적인 DLTS 방법에서는 무게함수의 주파수를 2.5Hz~50Hz 범위에서 변화시켰으며, 온도변화는 77K~400K 사이에서 2K/min로 온도를 증가시키며 측정하였다.

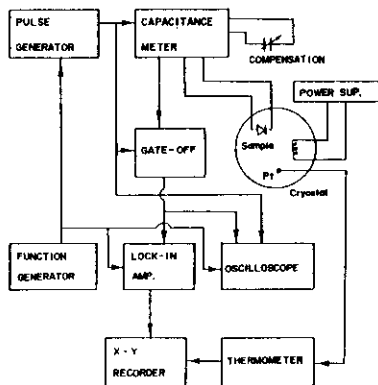


그림 4. 채택한 DLTS 시스템의 계통도  
Fig. 4. Block diagram of the DLTS system employed.

IV. 결과 및 고찰

그림 5는 상기 시스템을 사용하여 n-HB GaAs Schottky diode를 시료로 하여,  $e_m = 12.55 \text{S}^{-1}$ 의 rate window로 측정된 DLTS스펙트럼의 한예이다. 그림 5에서 보는 바와같이 본 실험의 측정온도 범위내에서 사용된 시료의 경우 5종의 깊은준위가 관측되었다. 무게함수의 주파수f에 따른 rate window를 변화시키며 측정된 통상적인 DLTS방법으로 이중 4종의 깊은준위의 파라미터를 결정할 수 있었으며, 이때 측정된 온도에 따른 방출률을 그림 6의 Arrhenius diagram에 나타내었다. 또한 그들의 특성은 표 2의 괄호안에 주어져 있으며, 이들의 명명은 Martin등이 보고한<sup>(1)</sup> "Signature"와 비교하여 그에 따랐다.

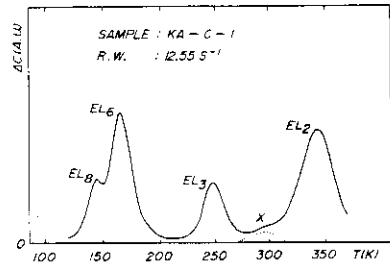


그림 5. Undoped n-HB GaAs 시료에 대해 rate window  $e_m = 12.55 \text{S}^{-1}$ 로 측정된 전형적인 DLTS 스펙트럼

Fig. 5. Typical DLTS spectrum of undoped n - HB GaAs samples measured with the rate window of  $e_m = 12.55 \text{sec}^{-1}$ .

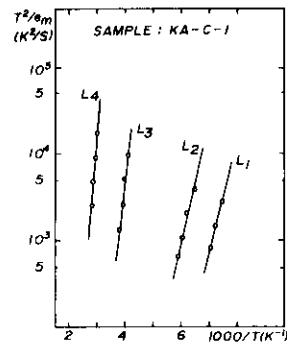


그림 6. 통상적인 DLTS방법으로 결정한 4종의 깊은 준위에 대한 arrhenius도

Fig. 6. Arrhenius plots of 4 different deep levels determined by conventional DLTS method.

EL<sub>2</sub>와 EL<sub>4</sub>은 undoped GaAs bulk crystal에서의 main electron trap들로서<sup>(10)</sup> EL<sub>4</sub>은 native defect라는

것이 밝혀져 있고,<sup>(11)</sup> EL<sub>1</sub>는 현재 antisite cluster여부가 논의중인<sup>(10)</sup> 깊은준위이다. 그림 5에서 X로 나타낸 깊은준위는 통상적인 방법으로는 조사할 수 없었으나, 앞서 논의한 곡선모양 해석법을 적용하여 실제 DLTS 스펙트럼으로 부터 EL<sub>1</sub>와 EL<sub>2</sub>의 이론적 스펙트럼을 소거함으로써 X만에 의한 DLTS스펙트럼을 재구성할 수 있었다. 재구성된 X만에 의한 스펙트럼을 그림 5에 점선으로 도시하였으며, 그 파라미터들을 표2에 제시하였다. 표2에서 괄호밖의 값들은 곡선형 해석방법으로 결정한 깊은준위의 파라미터들이다. EL<sub>1</sub>와 EL<sub>2</sub>의 경우 곡선형 해석을 위한 측정치로는 두 준위가 중복되지 않는 DLTS스펙트럼부분, 즉 EL<sub>1</sub>의 경우는 T<sub>1</sub>; EL<sub>2</sub>의 경우는 T<sub>2</sub>의 값들을 취하였다. 이표로부터 두 방법에 의한 파라미터값들이, 특히 스펙트럼의 중복이 없는 경우는, 실험오차 한계내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

본 연구의 일화 온도 주사 DLTS방법과 double gate box-car를 사용한 시스템에서의 그것을 비교할 때, double gate box-car 방법의 경우 DLTS스펙트럼의 반폭은 측정시간의 비  $r=t_2/t_1$ 에 따라 변하며, <sup>(11)</sup>r역시 DLTS스펙트럼의 폭과 S/N비를 고려하여 경험적으로 설정하므로, <sup>(11)</sup> 곡선형 해석을 위한 최적조건은 미리 정하기 어려운 난점이 있다. 그러나 본 방법에서는  $\Delta E_n/e_m$ 이 채택하는 적분기의 형태에 따라 변하나 주파수 f에는 무관하게 주어진다. 따라서 부분적으로 증첩된 깊은준위의 특성을 조사하기 위해서는 스펙트럼의 분리를 높일 수 있는 二相 광대역 lock-in증폭기를 선택하는 것으로 충분함을 알 수 있다. 또한 이 시스템은 그 자체로서 감도가 double gate box-car 방법보다 높으므로, 저농도의 깊은준위를 측정하는데 있어서 유리함을 알 수 있다.

표 2. 두가지 방법으로 관측된 5종의 깊은준위 파라미터

Table 2. Parameters of 5 deep levels observed by two different methods.

Level	$\Delta E$ (eV)	S (cm <sup>2</sup> )	$N_T$ (cm <sup>-3</sup> )
EL <sub>1</sub>	0.23 (0.25)	1(5.1) × 10 <sup>-15</sup>	5.6 × 10 <sup>13</sup>
EL <sub>2</sub>	0.33 (0.30)	5(5) × 10 <sup>-15</sup>	2.1 × 10 <sup>14</sup>
EL <sub>3</sub>	0.62 (0.60)	3(1) × 10 <sup>-12</sup>	2.2 × 10 <sup>14</sup>
EL <sub>4</sub>	0.75 (0.74)	5.5(5) × 10 <sup>-14</sup>	8.8 × 10 <sup>14</sup>
X	0.72	1.1 × 10 <sup>-17</sup>	8 × 10 <sup>13</sup>

\*Parameters in parentheses are observed by conventional DLTS method.

V. 結 論

본 연구에서는 lock-in 증폭기로 구성된 DLTS시스

템에서 과도정전용량을 처리하는 방법을 S/N비, 스펙트럼의 분리도등을 중심으로 비교하였다. 그 결과 광대역 二相 lock-in 증폭기를 사용하는 것이 스펙트럼 분리면에서 큰 장점이 있음을 보였다. 또한 1회 온도 주사에 의한 DLTS 스펙트럼으로 부터 곡선형 해석을 행함으로써 깊은준위의 파라미터를 결정하는 방법을 제시하였다. 이 방법을 n-GaAs의 깊은준위 측정에 적용하여, 논의된 방법이 종래의 DLTS 방법으로는 측정할 수 없는 저농도의 깊은준위도 측정가능한 장점이 있음을 보였다.

參 考 文 獻

- [1] G.F. Neumark and K. Kosai, "Deep levels in wide band - gap semiconductors," *Semiconductors and Semimetals*, vol. 19, Academic Press, New York, pp. 1-74, 1983.
- [2] J.M. Hwang, D.K. Schroder and W.J. Biter, "Deep levels introduced into Si during H<sub>2</sub> plasma annealing," *J. Appl. Phys.*, vol. 57, pp. 5275-5278, 1985.
- [3] D.V. Lang, "Deep Level Transient Spectroscopy: A new method to characterize trap in semiconductors," *J. Appl. Phys.*, vol. 45, pp. 3023-3032, 1974.
- [4] C.R. Crowell and S. Alipanahi, "Transient distortion and n<sup>th</sup> order filtering in DLTS," *Solid State Electron*, vol. 24, pp. 25-36, 1981.
- [5] G.L. Miller, J.V. Ramirez and D.A.H. Robinson, "A correlation method for semiconductor transient signal measurements," *J. Appl. Phys.*, vol. 46, pp. 2638-2644, 1975.
- [6] J.M. Noras, "Transient distortion and DLTS," *Solid State Commun.*, vol. 39, pp. 1225-1227, 1981.
- [7] A. Le Bloa and P.N. Favennec, "Analysis of DLTS by 2<sup>nd</sup> harmonics," *Rev. Phys. Appl. (FRA)*, vol. 17, pp. 759-767, 1982.
- [8] D.S. Day, M.Y. Tsai, B.G. Streetman and D.V. Lang, "Deep Level Transient Spectroscopy: system effects and data analysis," *J. Appl. Phys.*, vol. 50, pp. 5093-5098, 1979.
- [9] G.M. Martin, A. Mitonneau, A. Mirea, "Electron traps in bulk and epitaxial GaAs crystals," *Electron Lett.*, vol. 13, pp. 191-192, 1977.

- [10] G.M. Martin, E. Esteve, P. Langlade and S. Markram - Ebeid, "Kinetics of formation of the midgap donor  $EL_2$  in neutron irradiated GaAs material," *J. Appl. Phys.*, vol. 56, pp. 2655-2657, 1984.
- [11] H. Lim et al., to be published in JKPS.
- [12] H. Goto, Y. Adachi and T. Ikoma, "How to determine parameters of deep levels by DLTS single temperature scanning," *Jap. J. Appl. Phys.*, vol. 18, pp. 1979-1982, 1979.
-